Eficiencia energética en la industria

Luis Miguel Muñiz González

Ingenieros Formación

Contenido

Eficiencia energética en la industria 1
Eficiencia energética en las instalaciones eléctricas 3
4.1. La energía eléctrica en la industria 3
4.2. Eficiencia energética en distribución de energía 3
4.2.1. Las pérdidas en la trasmisión de la energía 3
4.2.2. Energías circulantes 4
4.2.3. La calidad del suministro eléctrico 7
4.2.4. Criterios básicos de diseño de una instalación eléctrica eficiente 10
4.3. Accionamientos electromecánicos.....17
4.3.1. El motor asíncrono.....17
4.3.2. El variador de velocidad 23
4.3.3. Accionamientos de bombas centrífugas con variador de velocidad. Técnicas de ahorro de energía con el uso del variador de velocidad 27
4.3.4. Accionamientos de ventiladores con variadores de velocidad. Técnicas de ahorro de energía con el uso del variador de velocidad 29
4.3.5. Compresores de aire comprimido. Uso eficiente del aire comprimido y su generación.....31
4.3.6. El motor síncrono. 32

Eficiencia energética en las instalaciones eléctricas

4.1. La energía eléctrica en la industria

La electrificación del sector energético es una de las más inmediatas metas de la humanidad cara a combatir el cambio climático y abandonar los combustibles fósiles y sus efectos sobre el calentamiento global.

La captura de CO2, aun cuando alcanzara valores significativos no solucionará el problema de su emisión.

La única forma efectiva de atajar las emisiones de CO2 es el uso de energía eléctrica de origen renovable, y el uso de combustibles cuyo origen no sea fósil, que en gran medida tendrán y tienen origen en la energía eléctrica, como es el caso del hidrógeno.

El objetivo de esta cuarta unidad de aprendizaje es conocer el uso eficiente de la energía eléctrica en las aplicaciones industriales.

Antes de analizar el uso de la energía eléctrica en los consumidores finales, la energía tiene que ser distribuida y llegar al punto de consumo en condiciones de calidad y cantidad suficiente para dar un buen servicio, y esto tiene una importancia fundamental bajo el punto de vista de la eficiencia energética, aunque no se le preste siempre la atención que merece.

Aspectos como las energías circulantes o la calidad de suministro eléctrico, son factores muchas veces invisibles al ojo no entrenado y fuentes de pérdidas sustanciales de energía y productividad.

4.2. Eficiencia energética en distribución de energía

Durante la trasmisión de la energía eléctrica, la intensidad circulará por conductores con una impedancia resistiva, inductiva y capacitiva, que producirá pérdidas térmicas por efecto Joule en la componente resistiva, caída de tensión y consumo de energía reactiva en la inductiva, y por otro lado fuga de intensidad a tierra en el caso de la impedancia capacitiva entre el conductor y tierra.

Todos estos fenómenos han de ser contemplados en el diseño de una instalación eléctrica y en particular en el de una instalación de distribución eléctrica.

4.2.1. Las pérdidas en la trasmisión de la energía

En el proceso de trasmisión de la energía, tendremos que considerar las pérdidas en los diferentes estadios del proceso antes de llegar a la carga, que son distribución y trasformación. Estas pérdidas van a traducirse en un fenómeno muy importante bajo el punto de vista de la eficiencia energética en instalaciones eléctricas: la caída de tensión.

4.2.1.1. Pérdidas en distribución

El objetivo de una instalación de distribución es proporcionar energía eléctrica de calidad y en cantidad suficiente a los receptores finales de manera que la operación de éstos se verifique con calidad y eficiencia.

Las pérdidas de energía eléctrica en los conductores se traducen en calor, deterioro progresivo de los conductores y disminución de la tensión en bornes de los receptores.

Las pérdidas en los conductores dependen en primer lugar del cuadrado de la intensidad.

Es por esta razón por la que la distribución primaria de energía se realiza en alta

tensión, que permite trasportar y distribuir elevadas potencias con intensidades más pequeñas.

A medida que vamos haciendo descender el valor de la tensión en los trasformadores, las intensidades aumentan, y con ello, aumentan también las pérdidas en los conductores por efecto Joule.

Estas pérdidas aumentan si el valor de la impedancia de los conductores es más elevado. Es decir, un conductor de sección menor provocará, a igual intensidad, mayores pérdidas que uno de sección mayor.

Del mismo modo, la impedancia de un conductor de aluminio es mayor que la de un conductor de cobre de la misma sección.

La disposición de los conductores provoca asimismo una inducción mutua que altera la impedancia reactiva de los conductores, pero esta impedancia no provoca pérdidas térmicas, sino caída de tensión, que también tendrá consecuencias sobre la eficiencia del sistema eléctrico.

La temperatura tiene también efectos perjudiciales en la caída de tensión, pues con el incremento de la temperatura aumenta la resistividad de los conductores.

4.2.1.2. Pérdidas en trasformación

Las pérdidas en los trasformadores se componen de las pérdidas fijas y variables. Hay que considerar y recordar que las pérdidas variables, por el efecto de regulación, implican la reducción de la tensión disponible en bornes del lado de baja tensión del trasformador.

4.2.1.3. Caída de tensión

La caída de tensión tiene además efectos combinados que afectan negativamente a la eficiencia de una instalación eléctrica industrial.

Con la caída de tensión se produce un efecto encadenado de aumento de la intensidad en los receptores de tipo motórico.

El motor de inducción entrega su potencia en función del par resistente, por lo que si se produce una disminución en su tensión de alimentación se genera un aumento de la intensidad absorbida con el fin de mantener la potencia y el par en el eje.

En consecuencia, este aumento de intensidad produce a su vez un aumento de la caída de tensión en el conductor, aumentando de nuevo las pérdidas y la caída de tensión.

La adopción de secciones moderadamente sobredimensionadas, es una muy buena alternativa para mejorar la eficiencia energética en una red de distribución eléctrica industrial.

El otro modo de reducir la caída de tensión está relacionado con la compensación de reactiva. La caída de tensión aumenta en los conductores eléctricos cuando el factor de potencia de la carga adopta valores inductivos. Por esta razón, y con el fin de mejorar tanto la caída de tensión como aprovechar al máximo la sección de los conductores, es preciso hacer todo lo posible para reducir en todas las fases de la distribución la energía reactiva en los conductores, compensando dicho consumo con baterías de condensadores, tan cerca de los focos de consumo como sea posible.

4.2.2. Energías circulantes

Llamamos energías circulantes a aquellas componentes de la energía eléctrica que no son transformables en energía útil. Las principales energías circulantes son los armónicos y la energía reactiva.

4.2.2.1. Armónicos

El aumento de receptores eléctricos no lineales ha aumentado la emisión de corrientes y tensiones armónicas en las redes de distribución y consumo eléctrico.

Lo primero que tenemos que entender es qué son cargas no lineales. Una carga lineal es aquella que se rige por la ley de Ohm, que nos dice que existe una relación proporcional directa entre la tensión y la intensidad a la que se ve sometida una resistencia, o carga en general, cuando en sus bornes aparece una diferencia de potencial.

Cuando la ley de Ohm no se cumple de forma directa, estamos en presencia de una carga no lineal.

Son cargas no lineales la mayoría de las cargas basadas en semiconductores, cuya intensidad es función de la polaridad, por ejemplo, o aquellas otras afectadas por ciclos de histéresis.

Cuando una carga no es lineal, la relación entre la tensión y la intensidad sufre una distorsión que hace que tensiones sinusoidales produzcan intensidades no sinusoidales.

Estas intensidades no sinusoidales pueden ser descompuestas, en una serie de ondas sinusoidales de frecuencias múltiplos de la frecuencia fundamental de 50 Hz. Estas ondas constituyen las denominadas ondas armónicas.

Estas frecuencias armónicas generan a su vez caídas de tensión que deforman la onda de tensión. A estos fenómenos los denominamos distorsión armónica de intensidad y distorsión armónica de tensión.

Entre otros efectos negativos en las redes, la distorsión armónica provoca ineficiencias en la intensidad disponible en los conductores y pérdidas por calentamiento en conductores y receptores. Los armónicos aumentan además las corrientes de fuga en los conductores y provocan disparos intempestivos de las protecciones.

La electrónica de potencia ha permitido grandes avances en el campo de la automatización y los accionamientos de velocidad variable, pero es preciso mantener bajo control sus efectos adversos, especialmente la generación de armónicos, y en su caso, dotar a las instalaciones de equipos de compensación con tecnologías de compensación pasiva o activa.

4.2.2.2. Energía reactiva

Gran parte de los receptores electrotécnicos presentes en la industria precisan del consumo de energía reactiva para su funcionamiento.

La energía reactiva es necesaria para el normal funcionamiento de gran parte de los receptores, pero a diferencia de la activa, puede ser generada in situ sin necesidad de un aporte energético adicional.

La energía reactiva es una de las denominadas energías circulantes.

La energía reactiva es consumida en los receptores, por ejemplo, motóricos, pero puede ser generada en los mismos bornes de conexión del motor mediante condensadores.

Es decir, podemos generarla en el mismo punto de su consumo sin necesidad de más máquina o aporte mecánico que una carga capacitiva.

La energía reactiva precisa de la circulación de intensidad reactiva, en cuadratura vectorial con la intensidad activa, por lo que se genera una intensidad aparente, que es la que define la sección necesaria en los conductores.

Quiere esto decir que los conductores han de ser dimensionados, así como los trasformadores, para las intensidades y las potencias aparentes.

Es por ello que si hacemos que la intensidad reactiva no aparezca en la red estaremos haciendo disminuir la caída de tensión, y además, podremos utilizar trasformadores y conductores de menor sección y potencia.

La energía reactiva ocupa las redes de forma innecesaria, por lo que ha de ser compensada tan cerca como sea posible de los puntos de consumo.

Esto define las estrategias de compensación de reactiva.

4.2.2.3. Modos de mitigación de armónicos

Existen varias formas de suprimir los armónicos o, al menos, mitigar sus efectos.

El método más sencillo es la instalación de inductancias de línea colocadas en serie con la alimentación, con lo que se reducen los armónicos de corriente de línea y, por tanto, el valor eficaz de la corriente absorbida, y también la distorsión en el punto de conexión del receptor.

Además, es posible instalarlo sin intervenir en el equipo generador de armónicos y utilizar inductancias comunes a diversos equipos.

Una segunda opción es la utilización de rectificadores dodecafásicos en las aplicaciones de conversión a corriente continua.

Esta solución consigue, por combinación de las corrientes, eliminar en el primario los armónicos de orden más bajo, como el 5º y 7º, frecuentemente los más molestos por su mayor amplitud.

Se pueden elegir estrategias de filtración pasiva, activa o híbrida.

La filtración pasiva consiste en colocar una impedancia baja a las frecuencias a atenuar mediante una adecuada configuración de componentes pasivos de tipo inductivo, capacitivo o resistivo, instalados en derivación con la red.

Para filtrar varias componentes, pueden ser necesarios varios filtros pasivos en paralelo. El dimensionamiento de los filtros armónicos debe de ser cuidadoso: un filtro pasivo mal diseñado puede conducir a resonancias cuyo efecto puede amplificar las frecuencias que no eran perjudiciales antes de su instalación.

La filtración activa consiste en neutralizar los armónicos emitidos por la carga analizando los armónicos consumidos por la carga y reconstruir la misma corriente armónica con la fase conveniente en oposición a las corrientes a compensar. Es posible poner en paralelo varios filtros activos.

Un filtro activo puede ser, por ejemplo, asociarse a un SAI para reducir los armónicos inyectados aguas arriba.

La filtración híbrida, formada por un filtro activo y un filtro pasivo, abarca las ventajas de las soluciones de ambos tipos de filtrado y cubre un amplio margen de potencias y prestaciones.

La gran diferencia entre filtración activa y filtración pasiva es que aunque las dos han de ser estudiadas de acuerdo con las características de la red y sus consumidores, la activa puede ser reprogramada en caso de cambios en los receptores. El rango de inversión de una compensación activa es mayor que en el caso de la compensación pasiva.

4.2.2.4. Compensación de la energía reactiva

La ubicación de los equipos de compensación dentro de una instalación puede ser:

- Global, utilizando un equipo para toda la instalación
- Parcial compensando grupo a grupo de receptores.
- Individual, compensando en cada receptor.

En principio, la compensación ideal, es aquella que se aplica en el mismo punto de demanda. En la práctica, los factores técnicos y económicos determinarán la elección del equipo y el punto de compensación.

En la compensación global la batería de condensadores está conectada al embarrado del cuadro de distribución principal de baja tensión y permanece en servicio durante el periodo de carga normal. Suprime las penalizaciones por un consumo excesivo de energía reactiva, ajusta la potencia aparente a la necesidad real de la instalación y descarga el centro de transformación (potencia disponible en kW). La corriente reactiva (Ir) está presente en la instalación desde el nivel de compensación hasta los receptores y las caídas de tensión en los cables de los receptores no quedan disminuidas.

Cuando usamos la compensación parcial por grupos los equipos de compensación están conectados en el embarrado de cada cuadro de distribución local.

Una parte significativa de la instalación se ve beneficiada por este tipo de compensación, sobre todo los cables de alimentación del CGBT y cada uno de los cuadros de distribución secundarios en los que se aplican las medidas de compensación. Esta forma de compensación suprime las penalizaciones por un consumo excesivo de energía reactiva, optimiza la parte de la instalación desde el cuadro principal hasta los secundarios, descarga el centro de transformación y se reduce la sección de cables aguas arriba de los cuadros locales. Se disminuye asimismo la caída de tensión en estos tramos.

Existe riesgo de sobrecompensación y sobredimensionado, pues si hay grandes variaciones de carga no se aprovechan los factores de simultaneidad.

En la compensación individual los condensadores se conectan directamente en bornes de los receptores. Es recomendable utilizar la compensación individual cuando la potencia de un motor es significativa con respecto al conjunto de la potencia total demandada por la instalación. Generalmente la potencia reactiva a compensar está sobre un 25% de la potencia del motor, en kW. Igualmente se recomienda utilizar la compensación fija para compensar el transformador de potencia.

La principal ventaja es que optimiza toda la instalación eléctrica. La corriente reactiva Ir se abastece en el mismo lugar de su consumo. La corriente reactiva no está presente en los cables de la instalación y las caídas de tensión en los cables se suprimen totalmente.

4.2.3. La calidad del suministro eléctrico

La calidad del suministro eléctrico es un factor clave de eficiencia energética, por cuanto los fallos de suministro se traducen en ineficiencias productivas, fallos de calidad y mermas de producción de todo tipo.

4.2.3.1. Perturbaciones

Dentro del abanico de las perturbaciones de la calidad del suministro eléctrico, las más importantes son las interrupciones y huecos de suministro.

Otras perturbaciones menos frecuentes son las variaciones de frecuencia, los notches,

o el flicker.

- Huecos
  Las interrupciones se deben a la apertura de los elementos de corte por actuaciones de las protecciones de red. Se denominan breves sin su duración es menor de 3 minutos y largas si su duración excede este periodo.
  Por otro lado, los huecos de tensión son disminuciones transitorias del valor de la tensión de muy corta duración, de duración típica entre 20 ms y 0,5 segundos y una profundidad de caída entere el 10 y el 60% de la tensión nominal. Pueden afectar a una, dos o a las tres fases, y su origen está en faltas en líneas o instalaciones eléctricamente próximas, maniobras de conmutación o el arranque de grandes cargas.
  Los huecos de tensión generan paradas no deseadas, por disparo de las protecciones y por fallos en los sistemas de control y/o trazabilidad de los procesos.
- Perturbaciones de la frecuencia
  Las variaciones de frecuencia son oscilaciones de la frecuencia de 50 Hz.
- Notches
  Los notches son impulsos periódicos de baja amplitud y frecuencia mayor de 50Hz que se superponen sobre la onda fundamental
- Flicker
  El flicker es una variación periódica de la amplitud de la onda de tensión que provoca alteraciones en la intensidad de las fuentes luminosas, entre otros efectos.
- Subtensiones y sobretensiones
  Las sobretensiones son elevaciones del nivel de tensión por encima del valor nominal. Pueden ser transitorias, a las que denominamos picos, o temporales, que afectan a varios periodos de onda y al valor eficaz.
  ¿Cómo gestionamos desde nuestra industria las variaciones de tensión?
  Si disponemos de un CT propio, desde el punto de vista de la eficiencia, deberemos de mantener la tensión de salida en el mayor valor posible, siempre que no produzca daños en nuestros equipos e instalaciones, con el fin de reducir las pérdidas en todos los conductores y receptores. Las variaciones de tensión de la compañía distribuidora pueden condicionar este objetivo.

4.2.3.2. Estrategias de mitigación de las perturbaciones del suministro eléctrico

La mitigación de las perturbaciones de la calidad de suministro puede ser abordada bajo dos enfoques.

El primero de los enfoques es el estratégico, es decir, cómo vamos a diseñar o modificar nuestras instalaciones de modo que no sean vulnerables a las perturbaciones. El segundo enfoque se centraría en el aparellaje y equipos a implantar para compensar los efectos de las perturbaciones sobre la red.

El enfoque estratégico vendrá definido por 3 fases de actuación. En función de los daños ocasionados y la frecuencia de las faltas de calidad de suministro, se han de afrontar soluciones proporcionales a los efectos:

- En la fase 1, de ajustes, deberemos implantar medidas de coste nulo o casi nulo que hagan nuestra instalación eléctrica más robusta, tales como revisar los parámetros de disparo por mínima tensión, programar los variadores de velocidad en modo "rearranque volante", o reforzar en los variadores el Bus de continua de manera que parte de la energía almacenada en ellos supla los huecos de corta duración.
- En una segunda fase abordaremos medidas de alimentación segura de los

equipos de control y automatización. Se puede dotar a los sistemas de control de alimentaciones seguras mediante SAI's. Alimentaremos a PLC's, sistemas informáticos, sistemas de control de motores, contactores, sensores de medida de procesos, …, cargas de poca potencia, pero importantes desde el punto de vista de la continuidad del servicio.

- Finalmente, una tercera fase incluirá soluciones de alimentación segura de todo el proceso. Entre otras soluciones disponibles como SAI's con baterías, el dispositivo que permite solucionar los problemas generados por los huecos es el denominado DVR (digital voltage restorer). Estos equipos, cuando la potencia a suplir es elevada, pueden ser inversiones muy elevadas y no siempre justificables.)

4.2.3.3. Equipos de mitigación de las perturbaciones del suministro eléctrico

- El DVR
  El dispositivo que permite solucionar los problemas generados por los huecos es el denominado DVR (digital voltage restorer).
  Ante un hueco monofásico o trifásico, recurre a energía almacenada, procedente de las otras fases, o procedente de una fuente de energía alternativa, para reponer la tensión a sus niveles seguros a través de un trasformador serie que inyecta energía en la fase que ha sufrido el hueco
  El origen de la energía supletoria puede ser de origen mecánico, como por ejemplo un volante de inercia o de origen eléctrico, bien baterías o bien tensiones procedentes de las otras fases, a través de rectificadores y onduladores.
- El SVC
  El SVC es un equipo de compensación de energía reactiva dinámico basado en electrónica de potencia para modular la carga capacitiva sin los saltos producidos por la compensación en etapas. Es de aplicación en cargas complejas, tales como los hornos de arco.
- El SAI
  Cuando las interrupciones son de más larga duración, el equipo adecuado es el SAI. El SAI proporciona de modo permanente una alimentación segura. Está dotado de algún sistema de alimentación o almacenamiento de energía complementario (Baterías, apoyo de grupo electrógeno, volante de inercia con generador, …). Para potencias y tiempos elevados, el coste de las baterías o fuentes alternativas pueden encarecer su precio y volumen. Se usa en aplicaciones de elevada seguridad, tales como quirófanos o centros de proceso de datos, por citar algunos ejemplos.
- Protección contra sobretensiones
  Otro gran grupo de dispositivos de protección son los descargadores de sobretensiones. Son dispositivos de impedancia variable con la tensión. Si la tensión se eleva, la impedancia disminuye drásticamente, derivando al conductor de protección de tierra la sobretensión, protegiendo los circuitos aguas debajo de los descargadores.
  Estos equipos suelen instalarse de forma escalonada en las instalaciones, incluso desde el lado de alta tensión, de manera que a medida que vamos avanzando por el circuito el grado de protección se eleva. Las sobretensiones más acusadas se derivarán en cabecera del circuito y las más tenues, que afectarían a los equipos más sensibles, estarían colocadas aguas abajo en la red, cerca de los equipos finales.
  En todos ellos, el factor determinante es la buena calidad de la puesta a tierra, con valores resistivos bajos y tendidos rectilíneos de los conductores.

Estos dispositivos, combinados con pararrayos atmosféricos adecuados son la mejor garantía de una protección adecuada contra todo tipo de sobretensiones.

4.2.4. Criterios básicos de diseño de una instalación eléctrica eficiente

A la hora de afrontar el diseño de una instalación eléctrica industrial de alta y baja tensión, podemos tener en cuenta criterios de eficiencia energética o, por el contrario, podemos limitarnos a diseñar una instalación únicamente con criterios funcionales.

En ambos casos, la instalación puede realizar su función de forma satisfactoria, pero desde el punto de vista de la eficiencia energética, pequeñas diferencias operando de forma continua durante 24 horas los 365 días del año pueden marcar diferencias, que pueden parecer inapreciables, pero que, al cabo de los años, pueden generar un importante ahorro energético y reducción de emisiones.

Resumimos aquellas medidas, fáciles de implantar en fase de diseño, que pueden optimizar el rendimiento energético de una instalación de distribución.

Gran parte de las medidas aplicables guardan relación con el fenómeno de la caída de tensión en las líneas, con repercusiones en las pérdidas por distribución y por el deficiente nivel de tensión aplicado a los receptores finales.

También haremos hincapié en el papel de energía reactiva, su necesidad y su influencia en la disponibilidad de las redes eléctricas.

Revisamos algunos conceptos ya desarrollados, pero incidiendo en esta ocasión sobre los criterios de diseño, fundamentales en la fase inicial de una instalación eléctrica industrial.

4.2.4.1. El centro de trasformación

La primera gran decisión durante el diseño de una instalación eléctrica industrial es definir el nivel de tensión de suministro.

Desde el punto de vista de la inversión inicial, el suministro en baja tensión es más accesible, por cuanto el suministro en alta tensión precisa de la instalación de al menos un centro de trasformación de abonado.

Existen además condicionantes que pueden ser impuestos por la compañía distribuidora, que puede imponer el suministro en alta tensión a partir de un determinado nivel de potencia a contratar.

En toda planta industrial, hay que tomar algunas decisiones sobre la disposición y uso de los centros de trasformación:

- ¿Qué nivel de tensión vamos a utilizar?
- ¿Es suficiente la instalación de un solo centro de trasformación o mi industria puede precisar de una red interna de distribución de alta tensión)
- ¿Existen receptores que puedan ser alimentados en alta tensión?
- ¿Qué margen de potencia tengo que contemplar a la hora de dimensionar el trasformador con respecto a la potencia demandada?
- ¿Trasformadores acoplados en paralelo o circuitos independientes?

¿Qué nivel de tensión vamos a utilizar?

Normalmente una vez decidida o impuesta por la compañía la alimentación en alta tensión, existen normalmente, al menos 2 niveles de alimentación, para diferentes tarifas. Las tarifas más elevadas requieren inversiones más elevadas por los elevados niveles de aislamiento de los equipos. Por otro lado, la parte regulada de las tarifas eléctricas, los ATR, son más económicos al aumentar el nivel de tensión y pasar la

tarifa, por ejemplo, de 6.1 a 6.2.

Sin embargo, hay que tener en cuenta que las pérdidas fijas en los trasformadores pasan a cargo del cliente. Cuanto mayor es la instalación, más elevada debería de ser la tensión de alimentación. Por clarificar con un ejemplo: En el área de distribución de Cantabria, los niveles de tensión son 12,5kV para la tarifa 6.1 y 55kV para la tarifa 6.2.

Un cliente industrial ha optado por contratar tarifas 6.2 a 55 kV cuando la potencia a contratar supera los 5.000 kW. Este dato no es extrapolable, pero puede dar una idea de cuáles son las opciones.

¿Es suficiente la instalación de un solo centro de trasformación o mi industria puede precisar de una red interna de distribución de alta tensión?

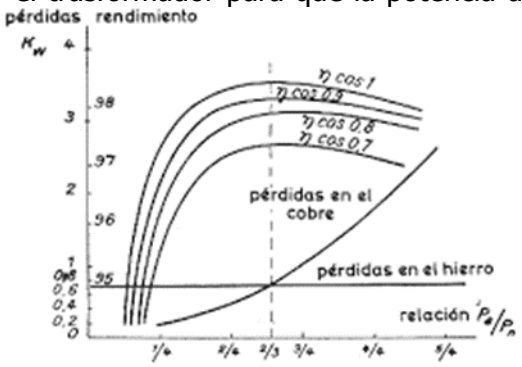
Esta decisión dependerá de las distancias, pero sobre todo, de la existencia de unidades productivas de características diferentes que puedan estar operativas independientemente las unas de las otras. La instalación de varios centros de trasformación reducirá en grandes instalaciones las tiradas largas de cables de baja tensión y con ello disminuirán las pérdidas y las caídas de tensión, mejorando la eficiencia general de la planta. Hay que pensar también que cada uno de los trasformadores estará dotado de su regulación de tensión, que permite adecuar la tensión de vacío y a plena carga a cada circunstancia, manteniendo la tensión en valores lo más altos posible.

¿Existen receptores que puedan ser alimentados en alta tensión?

En algunas circunstancias, algunos receptores de elevada potencia y marcha más o menos continuada pueden ser alimentados con motores de alta tensión. Pensemos en las bombas de una mina como las de la presentación, de 2.240 kW cada una en funcionamiento continuo, o en ventiladores de aspiración de humos de 1000 kW de una acería. Estos equipos pueden ser alimentados en alta tensión, tanto de forma convencional como mediante variadores de velocidad de alta tensión. Al disminuir la intensidad en alta tensión, también lo harán las pérdidas por calentamiento en los devanados.

¿Qué margen de potencia tengo que contemplar a la hora de dimensionar el trasformador con respecto a la potencia demandada?

El rendimiento de un trasformador es máximo cuando sus pérdidas fijas son iguales a las variables. Esto ocurre en un punto entre 2/3 y 3/4 de su carga máxima. Disminuye fuertemente por debajo de estos valores y desciende levemente por encima de ellos. Se suele dimensionar el trasformador para que la potencia demandada sea el 65% de



su potencia nominal.

El otro factor que influye en el rendimiento de un trasformador es el factor de potencia, haciendo disminuir el rendimiento cuando estamos en presencia de cargas inductivas, es decir con menor factor de potencia o coseno de phi; razón adicional para mejorar el factor de potencia de nuestras instalaciones mediante la compensación de

energía reactiva.

¿Trasformadores acoplados en paralelo o circuitos independientes?

Esta pregunta depende del tipo de estrategia de diseño seguida.

Si la estrategia es disponer de dos trasformadores iguales, cada uno de ellos con potencia suficiente para el 100% de la demanda, la pregunta es si hay que mantener los dos trasformadores conectados en paralelo a media carga en previsión de fallo de uno de ellos, o mantener uno de reserva desconectado.

Hay dos respuestas. Desde el punto de vista de la eficiencia energética, si hemos seleccionado trasformadores para que la plena carga se sitúe al 65% de su nominal, tendremos que estarán trabajando los dos a un 32,5% de carga, lo que nos arroja un pobre rendimiento del conjunto.

Bajo el punto de vista del diseño de la instalación, dos trasformadores en paralelo tendrán una potencia de cortocircuito en los embarrados comunes doble que en el caso del trasformador individual, por lo que el coste de inversión del aparellaje se incrementa sustancialmente, y en caso de cortocircuito, las intensidades de defecto pueden ser más destructivas.

Si, por el contrario, la estrategia es acoplar los trasformadores para unificar embarrados y asegurar un servicio mínimo en caso de avería, aunque el problema del índice de carga y el bajo rendimiento desaparece, el problema de las corrientes de cortocircuito se mantiene.

Es decir, es preferible independizar circuitos y disponer de soluciones alternativas en caso de avería, en lugar de la solución basada en el acoplamiento de trasformadores. Soluciones posibles son unificar las potencias y circuitos en lo posible para disponer de un trasformador de repuesto, o disponer de acoplamientos seccionables de barras que permitan alimentar a toda la instalación en caso de necesidad.

El acoplamiento puede ser una solución a problemas puntuales, pero puede ser un lastre energéticamente durante el funcionamiento normal.

4.2.4.2. Distribución en alta tensión

Ya hemos apuntado la importancia de la distribución en alta tensión para disminuir las pérdidas por caída de tensión.

Especialmente en presencia de componentes reactivas.

Cuando pasamos de distribuir en baja tensión, por ejemplo, a 400 VAC a distribuir en alta tensión, por ejemplo, a 12.5 kV, la relación de las intensidades pasa de 100 Amperios a 3,2 Amperios en alta tensión para la misma potencia.

Considerando que el nivel de pérdidas es proporcional al cuadrado de la intensidad, la relación de pérdidas sería de 10.000 a 10,24, es decir, que para igualar la caída de tensión en una distribución en baja tensión a la que tenemos en alta tensión, la relación entre las secciones de alta y baja tensión sería de 1 a 1000 aproximadamente.

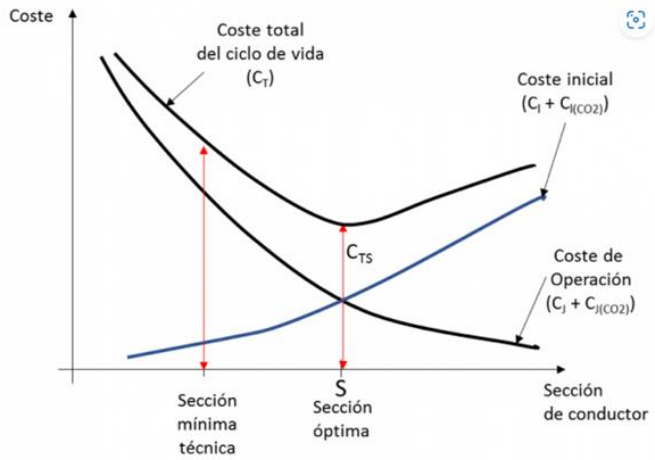
4.2.4.3. Secciones óptimas de distribución

La norma IEC 62125 es una norma de referencia que tiene en cuenta el impacto ambiental de los cables y la forma de razonar su reducción desde el punto de vista económico y ecológico. La norma IEC 62125 evalúa el impacto ambiental cualitativo, cuantitativo, además de la optimización de la sección del conductor basada en el coste ambiental y energético.

Desarrolla una metodología de cálculo que integra el coste del material y el tendido de

diferentes secciones de conductor, el valor de las emisiones de CO2 equivalentes del cobre utilizado y las pérdidas térmicas para una condición de funcionamiento dada, y finalmente se realiza la comparación del CO2 emitido por cada una de las soluciones de sección presentadas como alternativa.

Se comprueba que mientras el coste fijo aumenta con la sección su coste de operación



disminuye con la misma. El objetivo de la norma es encontrar la sección que minimice el coste total, en función de la suma de los conceptos anteriores:

El aumento de secciones sobre el mínimo exigible por criterios técnicos tiene además otras importantes ventajas que es oportuno recordar:

- Mayor vida útil de la línea al ir más descargada
- Posibilidad de ampliación de potencia sin cambiar el cable
- Menor caída de tensión
- Mejor respuesta a cortocircuitos

4.2.4.4. La importancia de la componente reactiva de los conductores

Durante la fase de diseño son varias las consideraciones que tenemos que abordar en lo que a la energía reactiva y sus efectos se refiere.

El efecto más destacable es que la energía reactiva ocupa las redes de distribución y los trasformadores, reduciendo su capacidad de trasmisión de potencia.

En las instalaciones eléctricas, la potencia útil es la potencia activa, que es la que se factura y se trasforma en otros tipos de energía como hemos visto anteriormente.

Sin embargo, la intensidad admisible en un conductor viene definida por la intensidad aparente, que es la raíz cuadrada de la suma de los cuadrados de las intensidades reactiva y activa, es decir, la hipotenusa del triángulo de potencia cuyos catetos son las intensidades activa y reactiva.

Para evitar esto compensamos la energía reactiva, mediante grupos de condensadores de capacidad variable tan cerca como sea posible del receptor final.

Sin embargo, en la práctica esto puede chocar con otros condicionantes. Por ejemplo, no es razonable repartir cientos de condensadores por toda una planta, dificultando el mantenimiento y exponiendo equipos eléctricos por recintos productivos.

Hay que tener en cuenta que la electrónica de potencia y el alumbrado LED han trastocado algunos principios clásicos de compensación de la energía reactiva. Los variadores de velocidad tienen un factor de potencia próximo a la unidad, mientras el motor asíncrono tiene un factor de potencia típico del orden de 0,85, en función de su

potencia. Por otro lado, el alumbrado LED también se alimenta de fuentes de corriente continua con factor de potencia próximo a la unidad. El uso de variadores de velocidad aporta de este modo la compensación in situ de los motores, descargando las líneas de alimentación de la energía reactiva, que se genera en el propio variador. Es esta una ventaja que no suele ser tenida en cuenta a la hora de instalar o no un variador de velocidad, entre otras ventajas.

La instalación de baterías de compensación fijas sólo tiene sentido en grandes receptores de funcionamiento permanente o casi permanente, como los trasformadores y grandes motores.

El otro gran efecto de la presencia de energía reactiva en las redes es la caída de tensión.

4.2.4.5. Caída de tensión y eficiencia energética

Sabemos que la caída de tensión se explica por la pérdida de energía activa en los conductores al paso de la intensidad activa por la impedancia resistiva de los cables, y que esa pérdida de energía se traduce en calor emitido por los conductores.

Pero también hay una componente de caída de tensión provocada por la componente inductiva de la intensidad al paso por la impedancia inductiva de los conductores.

Esta caída de tensión es mayor cuanto menor es el factor de potencia de las cargas alimentadas, por lo que la compensación juega un importante papel en la lucha contra la caída de tensión.

Por otro lado, la impedancia inductiva de los conductores depende no sólo de la naturaleza de éstos, definida por el número de hilos, sección o aislamiento, sino que también depende de la forma de tendido de los conductores, especialmente cuando existen varias venas por fase, en cuyo caso, la agrupación y disposición de las fases juega un papel determinante en la inducción.

https://www.prysmianclub.es/como-se-obtienen-los-valores-de-reactancia-de-los-cables-ejemplos-de-calculo/

Por esta razón, y por el adecuado reparto de cargas entre las distintas venas de una conducción de baja tensión, es necesario seguir los criterios de trenzado especificados en la norma UNE-HD 60364-5-52, en la que en su anexo H nos reporta información para la colocación de los cables cuando son precisos varios conductores por fase, incluyendo la disposición de los neutros.

De este modo, se minimiza tanto la inducción mutua como el desequilibrio entre conductores, disminuyendo también la caída de tensión del conjunto.

https://www.prysmianclub.es/instalacion-de-varios-conductores-por-fase/

4.2.4.6. Regulación de tensión de alimentación a los receptores eléctricos

Todo lo anteriormente expuesto nos lleva a que una instalación robusta es una instalación eficiente.

Y en esta robustez es especialmente importante a la hora de realizar el ajuste fino de tensión en el lado de baja de un centro de trasformación.

La tensión de salida en bornas de un trasformador puede ser regulada mediante un selector situado en su exterior que cortocircuita un número determinado de espiras de

los devanados modificando la relación de trasformación del trasformador, y con ello la tensión secundaria en baja tensión.

Como principio general de eficiencia energética debemos regular el secundario del trasformador al máximo valor posible y seguro.

Pero esto choca con otras realidades.

Como hemos indicado, la regulación de tensión es el fenómeno por el cual la tensión del secundario de un trasformador disminuye cuando aumenta el índice de carga, por lo que si definimos la tensión de alimentación para la condición de carga de la instalación, en los momentos de bajo índice de carga la tensión alcanzará valores elevados que pueden llegar a ser perjudiciales para determinados circuitos.

Por otro lado, sobredimensionando el trasformador, la diferencia de tensiones entre plena carga y carga en vacío disminuirá al disminuir el índice porcentual de carga diluido en la mayor potencia del trasformador, pero, por otro lado, sabemos que el rendimiento máximo del trasformador se verifica en torno al 65% de su potencia nominal y que a bajos índices de carga el rendimiento disminuye apreciablemente.

Por todo ello, es fundamental definir con la mayor precisión posible la potencia demandada de una instalación y dimensionar el trasformador en el margen del 65% y en lo posible instalar varios trasformadores que permitan realizar agrupaciones de cargas de marcha continuada, como instalaciones de producción o de servicios a fábrica, separadas de cargas de marcha variable o discontinua como oficinas y almacenes, optimizando el calibre del trasformador seleccionado.

4.2.4.7. Compensación de reactiva

Los efectos combinados de la energía reactiva, la regulación de tensión en los trasformadores y la caída de tensión, tanto por la componente resistiva, como por la componente inductiva, hacen que una instalación eléctrica pueda ser funcionalmente operativa, pero ineficiente tanto a nivel de distribución como de receptores finales.

Conviene recalcar que una instalación puede funcionar sin averías, pero ser muy ineficiente.

La eficiencia de una red de distribución eléctrica industrial requiere un mantenimiento preventivo activo.

La vigilancia de la compensación efectiva de la energía reactiva es fundamental.

Con el uso y el paso del tiempo, los condensadores que conforman las baterías de compensación de reactiva sufren deterioros en sus placas y dieléctricos que merman el valor de su capacidad, y con ello, su capacidad para generar energía reactiva. Es necesario realizar mediciones periódicas de la intensidad de los condensadores. Con el deterioro, el valor de la intensidad irá bajando. Por dar un ejemplo, en una reciente inspección de una gran instalación terciaria, se han detectado baterías de compensación de reactiva completas, con intensidades de 25 amperios en condensadores de intensidad nominal de 117 amperios, fruto de la falta de mantenimiento preventivo y de inspección periódica de los elementos durante años.

Las consideraciones sobre el diseño de una instalación de compensación de reactiva dependerán en cada caso, del tipo de receptores, la dispersión de la instalación y longitud de los conductores sometidos a componentes reactivas de la intensidad, de la simultaneidad de los receptores, por citar alguno de los factores.

Por fijar algunos conceptos, hay dos grandes estrategias de compensación y dos modos de ajuste:

- Modo de ajuste fijo y variable.
- Estrategia general o local.

Usaremos ajustes fijos cuando la componente reactiva no varíe, como en el caso de los trasformadores, y en grandes motores, de forma individualizada.

El ajuste variable puede utilizarse de forma general, en cabecera de una instalación, o bien en los cuadros secundarios, de forma local.

En el caso de utilizar estrategias de compensación generales, los conductores aguas abajo deberán de dimensionarse para soportar la componente reactiva, mientras que, en el caso de compensación local, esta componente aguas arriba de la compensación desaparecerá.

Por el contrario, disponer los condensadores de forma local e individualizada, hará que nuestra instalación tenga una potencia de generación de reactiva instalada mayor que si disponemos de compensación general, pues no se consideran las simultaneidades de los receptores.

Como se ve, no hay una solución única y además de los factores puramente de eficiencia energética, tendrán influencia factores como el coste de inversión y los costes de mantenimiento y vigilancia de la instalación.

4.2.4.8. Generación y compensación de armónicos

La utilización en la industria de los variadores de velocidad, arrancadores estáticos, tiristores de regulación de temperatura mediante resistencias por efecto Joule, rectificadores, fuentes de alimentación, PLC's, alumbrado LED, servidores, SAI's y en resumen todos los equipos basados en electrónica de potencia y microelectrónica de control generan armónicos de corriente.

Al igual que en el caso de la reactiva, la compensación de armónicos tiene estrategias locales y generales y modos de ajuste pasivo y activo.

Gran parte de los equipos disponen de filtros pasivos que reducen la emisión de armónicos, pero no todos. Es fundamental seleccionar equipos de electrónica de potencia de calidad y con certificados de compatibilidad electromagnética y declaración de armónicos de intensidad generados.

En grandes instalaciones con variadores de velocidad, arrancadores o tiristores de regulación de temperatura, puede ser conveniente realizar una compensación de armónicos con compensadores fijos en el cuadro general.

Finalmente, la compensación activa tiene sentido cuando en una gran instalación hay previsión de variaciones de emisión de armónicos.

La gran ventaja de la compensación activa es su adaptabilidad, tanto a las variaciones de utilización de una instalación, como a las modificaciones por ampliación de dicha instalación.

Una instalación de compensación de armónicos pasiva ha de ser diseñada e instalada expresamente para una condición de carga y emisión de armónicos, y no puede ser adaptada a nuevas condiciones de carga. A su favor tiene su menor coste de inversión con respecto a la de compensación activa.

Finalmente, la generación de armónicos de intensidad genera la distorsión de la onda de tensión en el trasformador, de nuevo en relación con el valor de la regulación del trasformador, que recordemos es la variación de la tensión al variar su carga. Si aumentamos la potencia del trasformador, disminuimos la distorsión en tensión, al disminuir el efecto porcentual de la regulación, con lo cual el factor de distorsión

armónica de tensión será menor, a igual distorsión en intensidad, cuanto mayor sea la potencia del trasformador. De nuevo, esta medida ha de ser considerada de forma coordinada con mantener el rendimiento del trasformador dentro de sus valores óptimos. La reducción de la impedancia de los conductores actúa en el mismo sentido, por lo que sobredimensionar los conductores, además de reducir la caída de tensión también tiene un efecto adicional sobre la reducción de la tasa de distorsión armónica de tensión.

4.3. Accionamientos electromecánicos

Una vez la energía eléctrica distribuida alcanza el punto final de consumo, ha de ser trasformada en otro tipo de energía de naturaleza diferente, ya sea térmica, lumínica, o mecánica.

Profundizaremos sobre la trasformación de la energía eléctrica en energía mecánica que se produce en los motores rotativos eléctricos más utilizados: el motor asíncrono y el motor síncrono.

La eficiencia energética de un accionamiento queda definida por el rendimiento de la transformación de la energía eléctrica en energía mecánica útil, en la mayor parte de las ocasiones, rotativa, y aunque existen en la actualidad prototipos y aplicaciones de motores lineales, su presencia a nivel industrial a día de hoy es aún muy limitada.

En este proceso de conversión se encadenan varias etapas de transformación y trasporte de la energía:

- En primer lugar, es preciso transferir la energía eléctrica desde la red de suministro al motor. Los equipos de arranque y/o la electrónica de potencia tales como los variadores y arrancadores estáticos, tienen un rendimiento propio que ha de ser considerado en el conjunto del accionamiento.
- En segundo lugar, la máquina eléctrica, o sea el motor, también usa y trasforma la energía electromagnética, con las consiguientes pérdidas (corrientes de Foucault, dispersión de flujo, …), pero también en su forma mecánica (ventilación, pérdidas mecánicas en los rodamientos, …), por lo que se generan pérdidas que afectan al rendimiento global del accionamiento.
- Por último, la componente final de todo accionamiento, la mecánica, también afectará al rendimiento general del sistema. Si ponemos el ejemplo de una bomba hidráulica, la transformación de la energía mecánica rotativa en energía potencial o cinética en el fluido impulsado dependerá en gran medida de la velocidad aplicada al conjunto mecánico. El rendimiento mecánico del elemento conducido afectará de forma significativa al rendimiento total. Nos centraremos en este sentido en dos tipos de accionamientos cuyos rendimientos están muy relacionados con la variación de velocidad, como son las bombas y los ventiladores. Para ello estudiaremos también el variador de velocidad como elemento clave en la utilización de accionamientos de velocidad variable como arma fundamental para la eficiencia energética de un proceso industrial.

La eficiencia de un accionamiento ha de ser estudiada de forma integral, adoptando soluciones que integren todas las etapas de trasformación de la energía, desde la selección del tamaño y tipo de actuador, hasta el diseño de los equipos mecánicos, acoplamientos, dispositivos de arranque progresivo, variadores de velocidad, ...

4.3.1. El motor asíncrono

¿Qué es un motor asíncrono y cuáles son las características que han hecho de él el accionamiento hegemónico, a día de hoy, en la industria?.

En primer lugar, es destacable su sencillez constructiva y de operación, que permite su funcionamiento sin conexiones rotóricas mediante escobillas, sin devanados de corriente continua que generen los polos magnéticos que otro tipo de máquinas precisan, sin necesidad de devanados auxiliares, decalaje de escobillas, y especialmente, su facilidad de arranque, que se consigue únicamente por su conexión directa a una red trifásica de distribución de corriente alterna, a diferencia de los motores de continua o asíncronos, que precisan de conversiones a corriente continua o sistemas de enganche y sincronismo en el caso de los motores síncronos.

En segundo lugar, su robustez mecánica, sin necesidad de conexiones móviles por escobillas susceptibles de fallo y desgaste o con la posibilidad de construir devanados rotóricos con conductores de aluminio macizos en forma de "jaula de ardilla", sin núcleos magnéticos de excitación independiente, ni materiales de elevado coste, como los imanes permanentes. Están básicamente fabricados con elementos relativamente simples de hierro, aluminio y conductores de cobre.

Ligado a este factor, su facilidad de mantenimiento, limitado al engrase o cambio de rodamientos.

En cuarto lugar, su versatilidad y adaptabilidad a cualquier tipo de par resistente, lo que facilita su arranque. Esto, unido a su aplicación conjunta con dispositivos de electrónica de potencia, permite su utilización en accionamientos de velocidad variable. El motor asíncrono dispone de un elevado par de arranque, superior al par de funcionamiento nominal.

Finalmente, el elevado rendimiento del motor de inducción proporciona accionamientos suficientemente eficientes en casi todos los campos de la técnica.

4.3.1.1. Principio de funcionamiento

Es importante conocer también al menos los modos de funcionamiento de la máquina asíncrona y comprender el concepto de deslizamiento.

El estátor de la máquina genera un campo giratorio inductor que se desplaza rotando a la velocidad de sincronismo, generando las corrientes rotóricas que a su vez generan las fuerzas electromotrices que empujan al rótor haciéndolo girar.

Si el rótor permaneciera bloqueado y estático, las frecuencias rotóricas coincidirían con las estatóricas, y la máquina así configurada se parecería mucho a un transformador con el secundario cortocircuitado.

Sin embargo, cuando liberamos el rótor del bloqueo, inicia el giro arrastrado por las fuerzas electromotrices que se generan en las bobinas del rótor.

Cuando empieza a girar, se produce una disminución de las frecuencias del rótor a medida que la velocidad de rotación aumenta.

Si la velocidad de giro del rótor aumentara hasta alcanzar la velocidad de sincronismo (hipótesis que en régimen motor no puede verificarse), el rótor alcanzaría la velocidad del campo y las corrientes rotóricas tendrían una frecuencia igual a 0 Hz.

Se verifica que a medida que la velocidad del rótor se acerca a la de sincronismo, se produce una reducción del valor de la fuerza electromotriz y el par que producen el giro del rótor.

De este modo, la máquina nunca alcanzaría, funcionando como motor, la velocidad de sincronismo, permaneciendo en régimen nominal de marcha, en una velocidad ligeramente inferior a la de sincronismo, y que varía con el par resistente aplicado al eje de la máquina.

Por esta razón también se denomina a la máquina de inducción, máquina asíncrona pues su velocidad en régimen de marcha motor, para un par resistente dado, será ligeramente inferior a la velocidad de sincronismo. Su velocidad dependerá precisamente del par resistente, disminuyendo levemente las revoluciones para incrementos elevados del par en la zona de trabajo. Esta diferencia entre la velocidad de sincronismo y la velocidad de giro del motor está relacionada con el parámetro de la máquina asíncrona denominado deslizamiento.

Se denomina deslizamiento **S** al cociente:

$$S = \frac{n_1 - n}{n_1}$$

Donde:

- S = deslizamiento
- n_1 = velocidad límite teórica correspondiente a la velocidad de sincronismo
- n = velocidad de giro del rótor

El deslizamiento en marcha nominal, en los motores comerciales, está comprendido entre el 3 y el 8 por 100, aumentando al disminuir el tamaño y potencia del motor. Así, encontraremos que el deslizamiento será mayor en los motores pequeños que en los motores de potencia más elevada.

En funcionamiento en régimen motor, el incremento de la carga mecánica aplicada en el eje en forma de par resistente genera la disminución de la velocidad de giro del rótor, con el consiguiente aumento del deslizamiento y con ello del valor de las corrientes rotóricas y de la propia frecuencia de estas corrientes. El aumento de las corrientes en el rótor y de su frecuencia, genera el aumento del par motor generado por la máquina, contraponiéndose al par resistente que provocó el incremento de la carga mecánica que aplicamos al inicio del párrafo. Con ello la máquina asíncrona se adapta en cada caso a la carga aplicada disminuyendo su velocidad y aumentando el deslizamiento y el par motor.

Funcionando en modo **MOTOR**, la velocidad de giro del rótor es inferior a la velocidad de giro del campo magnético o de sincronismo y el motor absorbe energía activa y reactiva de la red eléctrica, transformándola en energía mecánica con las consiguientes pérdidas eléctricas y mecánicas. El deslizamiento está incluido entre 1 y 0. La energía eléctrica circula del estátor al rótor.

Funcionando en modo **FRENO** el deslizamiento es mayor a la unidad, los signos de la velocidad de sincronismo y la del rótor son de signo contrario, es decir, el campo magnético gira en un sentido y el rótor, movido por el par externo, en el sentido contrario. La energía mecánica es aportada al eje desde el exterior. Sin embargo, la energía eléctrica fluye del estátor al rótor, oponiéndose al giro, es decir, funcionando como freno. Se producen fuertes corrientes rotóricas que pueden provocar el calentamiento del devanado inducido. El deslizamiento está incluido entre 0 y -1. La energía eléctrica circula del estátor al rótor. Es el denominado frenado a contracorriente.

En modo **GENERADOR** la velocidad del rótor es superior a la de sincronismo y del mismo signo, es decir, el rótor ha adelantado al campo del estátor. La energía mecánica externa, de carácter motriz, es aplicada en el eje y la energía eléctrica fluye del rótor al estátor y del estátor a la red, produciéndose generación de energía activa. La máquina no puede generar energía reactiva, por lo que la tiene que obtener de la red, razón por la cual la máquina asíncrona funcionando como generador tiene que hacerlo siempre conectada a una red que le proporcione la energía reactiva. El

deslizamiento es superior a 1. La energía eléctrica circula del rótor al estátor.

4.3.1.2. Características de placa, potencia, rendimiento, fdp.

De acuerdo con la norma UNE EN 60034-1, en la placa de características de una máquina eléctrica han de reflejarse los siguientes parámetros:

- Norma o marca del constructor
- Número de serie del fabricante
- Año de fabricación
- Código del fabricante para la máquina (modelo).
- N◦ de fases de la máquina de corriente alterna.
- N◦ de las normas aplicables en la fabricación. Si se indica 34 quiere decir que se cumplen todas las normas de la serie 34 de CEI.
- Grado de protección IP según CEI 34-5
- Clase térmica o calentamiento máximo admisible.
- Clase de servicio asignada.
- Potencia asignada.
- Tensión asignada.
- Frecuencia asignada.
- Intensidad asignada.
- Velocidad asignada.
- Instrucciones de conexión con texto y diagrama para máquinas con más de 3 bornas de conexión.
- Si la máquina está diseñada para un solo sentido de giro este deberá estar reflejado.

En la placa de características, la intensidad nominal refleja la intensidad que va a ser absorbida por la máquina a su régimen de carga nominal. Está indicada para las dos tensiones nominales de placa. Si el motor se conecta mediante 3 conductores, en arranque directo, o con variador, por ejemplo, la intensidad que circule por cada uno de los conductores en la condición de marcha nominal será la indicada en la placa.

Sin embargo, si el motor se ha conectado para realizar un arranque estrella-triángulo, habremos tenido que utilizar 6 conductores para acceder a cada uno de los 6 terminales de la placa de conexión, y de este modo, como veremos, realizar la conmutación de arranque.

Como dato muy relevante a la hora de realizar los cálculos de los conductores (intensidad máxima admisible, sección, caída de tensión, …), ha de tenerse en cuenta que la potencia reflejada en la placa es la útil en el eje, por lo que, para el cálculo de la intensidad habría de tenerse en cuenta el rendimiento y el factor de potencia.

La velocidad nominal de un motor es la correspondiente a la carga nominal.

Será siempre inferior a la velocidad de sincronismo y nos proporcionará indirectamente el valor del deslizamiento nominal de la máquina.

El rendimiento de un motor eléctrico es máximo cuando las pérdidas fijas se igualan a las pérdidas variables.

Este punto de máximo rendimiento se verifica constructivamente, normalmente para la condición de carga nominal máxima permanente, por lo que la utilización de motores de mayor tamaño del necesario traerá como consecuencia la disminución del rendimiento, pérdida del rendimiento que será mayor cuanto mayor sea la diferencia entre el tamaño óptimo y el que hayamos seleccionado.

No obstante lo anterior, ha de tenerse en cuenta que determinadas clases de servicio

suponen la necesidad de sobredimensionar el motor, por lo que también este factor ha de ser tenido en cuenta a la hora de seleccionar la potencia del motor.

Los motores, especialmente los de pequeño tamaño, pueden sufrir averías y posteriores reparaciones que irán en detrimento de su rendimiento. Holguras entre las chapas del circuito magnético o defectos mecánicos producidos durante las reparaciones, pueden hacer que el rendimiento de estos motores caiga varios puntos. Cada vez que se repara un motor, éste se somete a agresiones mecánicas, que pueden generar desajustes mecánicos entre las chapas magnéticas que aumentan las pérdidas del motor reparado.

Otro factor a tener en cuenta es si durante la fase de obra se adoptaron modelos de motor eficientes o simplemente se atendió al factor precio, criterio normal y posiblemente mayoritariamente adoptado.

Actualmente, existen en el mercado cuatro categorías de motores eléctricos asíncronos, atendiendo a su rendimiento.

Ha de considerarse que el rendimiento de un motor asíncrono aumenta al aumentar la potencia, es decir, por norma general, el rendimiento de un motor de 110 kW será mayor que el de un motor de 11 kW, y el de éste a su vez mayor que el de 1,1 kW.

La norma 60034-2-1:2014 identifica 4 clases de eficiencia en máquinas eléctricas rotativas, denominadas de IE1 a IE4, de menor a mayor eficiencia.

Bajo el punto de vista del explotador de una instalación, el control de los motores instalados y especialmente su rendimiento, constituye el punto de partida de toda acción encaminada a mejorar su eficiencia.

La sustitución de motores de rendimiento standard por otros de alta eficiencia puede significar importantes ahorros energéticos, especialmente en motores de calibres menores en los que la diferencia entre el rendimiento de un motor obsoleto y el de un motor de alta eficiencia, premium o super premium puede llegar a significar diferencias de hasta 10 puntos porcentuales.

Antes de realizar una reparación en un motor que ha sufrido una avería, es conveniente analizar la rentabilidad de adquirir un motor nuevo de clase de eficiencia elevada, pues podemos encontrarnos con que esta opción sea más ventajosa económicamente que la reparación.

4.3.1.3. Accionamiento mediante arrancador estático

Se denomina electrónica de potencia o electrónica industrial a la rama de la ingeniería eléctrica que desde mediados del siglo XX ha avanzado en el desarrollo de equipamiento y dispositivos capaces de modificar la naturaleza de las tensiones aplicadas en las máquinas eléctricas, con el fin de conseguir su variación de velocidad, o en el caso de otros receptores, como elementos de control de temperaturas, modular la respuesta de los sistemas electrotécnicos de forma regulada y continua.

El arrancador estático es el convertidor de potencia básico, utilizado en el arranque de motores asíncronos.

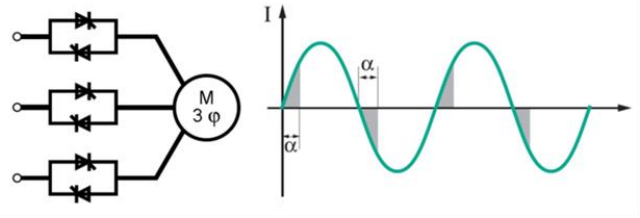
Convierte corriente alterna de un nivel de tensión determinado a corriente alterna de igual frecuencia pero de valor de tensión eficaz menor que la tensión de alimentación.

Su funcionalidad cuando se conecta a un motor asíncrono, reside en disminuir la tensión aplicada en el arranque para limitar la intensidad de conexión, a costa de una disminución del par-motor en el arranque, en comparación con el arranque directo.

La modulación de tensión se obtiene mediante el uso de tiristores en antiparalelo que

regulan el ángulo de disparo a partir del cual la semionda entra en conducción.

El valor eficaz de la onda obtenida a la salida del convertidor, varía aumentando a medida que disminuye el ángulo de fase α, desde un valor de tensión eficaz cero para un ángulo α=180ºC hasta el valor nominal de la tensión eficaz de la onda de alimentación cuando el mismo ángulo pasa a un valor nulo.



Para un ángulo α = 0, la tensión eficaz será la nominal de la red, al iniciarse la conducción en el momento del paso por cero de la tensión.

A medida que el ángulo va creciendo, el valor de la tensión eficaz disminuye al disminuir el área de la semionda en conducción.

4.3.1.4. Accionamiento mediante variador de velocidad

El segundo y más importante convertidor de potencia utilizado en el campo de los accionamientos electromecánicos es el variador de velocidad.

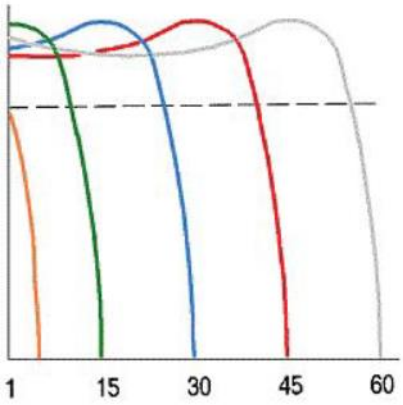
El variador de velocidad ofrece ventajas que ningún otro método proporciona durante el arranque del motor, y teniendo en cuenta que las funcionalidades del variador más sobresalientes guardan relación con el efecto de la variación de la velocidad de forma controlada y manteniendo el par máximo en el rango de funcionamiento nominal de frecuencias:

- Ofrece un alto par de arranque a velocidad nula
- Permite la posibilidad de frenado por inyección de corriente continua o por chopper externo durante el frenado
- Proporciona un adecuado control de la velocidad, que mediante el uso de algoritmos de control y sistemas de realimentación de velocidad, permite alcanzar prestaciones de muy elevada precisión.
- Existe en determinadas circunstancias la posibilidad de trabajar en modo de regeneración de energía.
- El variador permite la integración de funciones de protección de motor y la plena comunicabilidad de los parámetros de funcionamiento del motor para su monitorización y automatización, tanto a nivel de mando y control, como registro de valores de marcha y funcionamiento, aspectos claves bajo el punto de la eficiencia energética.

Si sometemos a la máquina asíncrona a una variación de su frecuencia de alimentación, el primer efecto es la variación de la velocidad de sincronismo en la misma medida que varíe la frecuencia y con ello, la velocidad de giro del rótor.

Esto irá acompañado de otros fenómenos electromecánicos, especialmente la variación del par.

El efecto de la variación de la frecuencia sobre el par disponible en el motor cuando mantenemos constante el ratio tensión/frecuencia, (y en consecuencia el flujo magnético generado), es que hasta que se alcanza el valor de tensión/frecuencia nominal, el par máximo se mantiene, y que para un mismo par resistente, el deslizamiento del accionamiento es equivalente para cualquier frecuencia aplicada, es decir, la curva par/velocidad se desplaza paralela a la curva base, a medida que se



modifica la frecuencia. **FRECUENCIA (Hz)**

De la relación entre el par resistente y el par motor dependerán factores como el tiempo de arranque, el calentamiento del motor en el proceso y la propia estabilidad del accionamiento.

4.3.1.5. Componente mecánica del accionamiento

Para comprender el funcionamiento de un accionamiento rotativo eléctrico es fundamental conocer el comportamiento mecánico del conjunto conducido o par resistente.

La relación de las características del par resistente con la clase del servicio del accionamiento es determinante para el dimensionamiento del accionamiento, que en determinadas circunstancias ha de sobredimensionarse para compensar el calentamiento en determinadas clases de servicio.

Todo accionamiento real estará conformado por diversas componentes variables con la velocidad del accionamiento, normalmente directas, es decir, el valor del par resistente aumenta con el aumento de la velocidad.

- Pares cuadráticos
  Bajo el punto de vista de los accionamientos de velocidad variable, la estrella es el accionamiento de par cuadrático. El par resistente aumenta con el cuadrado del aumento de la velocidad, con lo que la potencia entregada por el accionamiento aumenta con la potencia tercera de la velocidad. Este tipo de par resistente está relacionado con la fricción de las partículas fluidas, gaseosas o líquidas. Es el par resistente característico de bombas centrífugas y ventiladores.
- Pares constantes
  Podemos encontrarnos con sistemas cuyo par (o parte de él) no dependa de la velocidad y se mantenga fijo para cualquier valor de ésta.
  En determinados accionamientos, como bombas o ventiladores centrífugos, en los que otras componentes son nulas a velocidad cero, la componente fija constituye el par de arranque.
  Este tipo de par aparece en elevadores, amasadoras, prensas mecánicas, cintas transportadoras horizontales, molinos de bolas o compresores.
  Otro tipo de par es el par lineal. Una componente lineal del par resistente aumentará de forma proporcional a la velocidad de giro.

4.3.2. El variador de velocidad

El variador de velocidad constituye una herramienta fundamental cuando queremos optimizar la eficiencia de cualquier proceso industrial.

4.3.2.1. Principio de funcionamiento

El variador de velocidad trasforma en primer lugar la tensión alterna de red en corriente continua para a posteriori generar un sistema de potencia trifásica de frecuencia variable y controlada, aplicable únicamente a receptores motóricos. El elemento clave en esta trasformación es el ondulador.

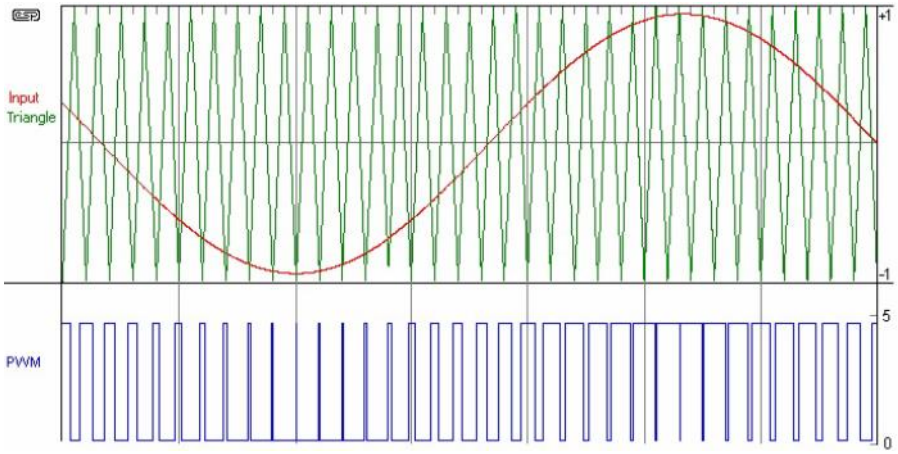
4.3.2.2. Constituyentes del variador de velocidad.

Las partes fundamentales de todo variador de velocidad son:

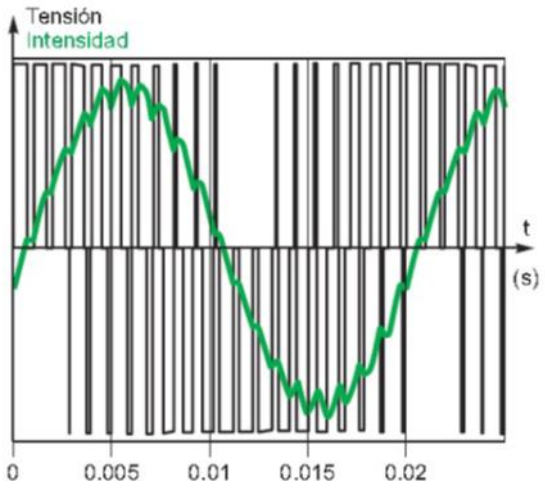
- Etapa rectificadora de entrada
- Etapa intermedia y chopper de frenado
- Ondulador de salida
- Sistema de control y panel de operación HMI (Human Machine Interface).

El ondulador (o inversor) es un convertidor de potencia que transforma la tensión continua de la etapa intermedia, de valor fijo, en una intensidad alterna compuesta por una onda cuadrada de amplitud fija y ancho variable de la onda cuadrada.

El algoritmo de generación de esta onda compleja se denomina PWM, modulación de ancho de impulsos, y se basa en generar una onda cuadrada, recortando la tensión continua, en impulsos de ancho variable de acuerdo con el patrón obtenido de superponer la onda senoidal deseada a una onda en diente de sierra de alta frecuencia. Los puntos de corte de la onda en diente de sierra determinarán las transiciones de la onda cuadrada.



Este modo de funcionamiento tiene una consecuencia electrotécnica determinantemente negativa, que es la aparición de altas frecuencias en la tensión a la salida del variador con efectos sobre la compatibilidad electromagnética de los circuitos. La forma de onda PWM de tensión que alimenta el motor, genera una intensidad cuya forma de onda es aproximadamente senoidal, consiguiendo el funcionamiento del motor asíncrono a la frecuencia de la onda senoidal patrón.



Cuanto más alta es la frecuencia de la onda en diente de sierra, menor es la amplitud de la distorsión generada en la intensidad, pero se produce un efecto indeseado por el aumento de las corrientes de fuga por los armónicos de intensidad que se generan.

Las frecuencias de conmutación son del orden de decenas de kHz y en algunos variadores, estas frecuencias de conmutación pueden ser variadas mediante parametrización con el fin de limitar y controlar la intensidad de fuga.

Si atendemos a los constituyentes del variador de velocidad, el primero es el rectificador. Su función es convertir la tensión alterna de entrada trifásica (aunque podemos encontrar también rectificadores de entrada monofásica), en una tensión continua que alimenta a la etapa intermedia.

Un rectificador es un convertidor electrónico de potencia que transforma la tensión alterna de la red, de valor eficaz 230 ó 400 voltios de corriente alterna a 50 Hz, en corriente continua.

En una primera división de los tipos de rectificador atenderemos al número de fases de entrada al variador:

- Podemos encontrarnos un primer tipo de variadores de entrada monofásica, alimentados entre fase y neutro, con entrada a 230 VAC 50 Hz. En estos casos, estos variadores permiten la conexión de un motor trifásico a una red monofásica, conectando el motor a la tensión correspondiente de 230 VAC en su placa de conexión.
- El segundo tipo sería el de los variadores de entrada trifásica, normalmente de tensión nominal 420 VAC.

Dentro de los variadores con entrada trifásica podremos encontrar dos grandes familias de variadores en función del tipo de rectificador empleado:

- Variadores con rectificadores sin posibilidad de regeneración de energía a la red, es decir, unidireccionales.
- Variadores con capacidad de regeneración de energía a la red, en los que la energía puede fluir de forma bidireccional.

En el primer caso, se utilizan dispositivos rectificadores no controlados, tales como diodos de potencia, que no permiten la circulación inversa de la corriente en ninguno de los casos.

En el segundo caso, el rectificador puede estar construido con componentes bidireccionales de conmutación controlada, por ejemplo, IGBT's en antiparalelo que

permiten la circulación bidireccional de la corriente.

La utilización de variadores con regeneración de energía se limita a aplicaciones muy concretas, por su mayor coste y menor difusión comercial en stocks y plazos de entrega, pero en determinadas circunstancias tienen una importancia crucial desde el punto de vista de la eficiencia energética.

Los componentes de la etapa intermedia son los condensadores y el chopper de frenado, que en determinadas aplicaciones disipa energía de frenado en resistencias externas.

Una vez rectificada la tensión de red, ésta es almacenada en la etapa intermedia en forma de corriente continua. La tensión continua es almacenada y filtrada por una batería de condensadores. Los condensadores actúan alisando los picos de tensión provocados por las conmutaciones en el rectificador y tienen también una función de almacenamiento de la energía eléctrica. En accionamientos complejos, también pueden funcionar contribuyendo a la absorción transitoria de los excesos de energía mecánica cuando la velocidad de giro del motor accionado supera a la frecuencia generada por el variador.

El tamaño de los condensadores de la etapa intermedia condiciona el funcionamiento del variador y su respuesta ante microcortes de tensión externos o ante sobretensiones producidas por el funcionamiento en modo generador del motor.

En algunos variadores, la etapa intermedia dispone de bornes de conexión externa cuando el variador no está provisto de chopper de frenado.

El chopper de frenado es un convertidor de corriente continua, normalmente constituido por dispositivos tipo MOSFET, cuya función es disipar los excedentes de energía activa que se inyectan desde el ondulador a la etapa de continua cuando el motor pasa a funcionar en modo generador.

Cuando no se dispone en el variador de un rectificador de tipo regenerativo, la energía activa en modo generador fluye del motor a la red, pero se ve bloqueada en el rectificador.

Esto produce un aumento de la energía acumulada en el condensador, que se traduce en el aumento de su tensión en bornes provocando un serio riesgo de destrucción de los condensadores y de ruptura inversa de los diodos rectificadores.

Un sistema de control de la tensión hace disparar a conducción el MOSFET de modo que la tensión de la etapa intermedia, debidamente conectada a una carga externa (normalmente denominada resistencia de frenado), permita la disipación de la energía excedentaria.

La energía derivada por el Chopper de frenado suele ser disipada en resistencias externas monofásicas. Estas resistencias tienen que estar diseñadas para soportar la carga térmica que se genera. En el dimensionado de estas resistencias, sobre todo en accionamientos de gran calibre, es fundamental conocer la clase de servicio del accionamiento y la capacidad de disipación térmica.

4.3.2.3. Aplicaciones de regeneración de potencia

En determinadas circunstancias, el variador puede funcionar conectado a un motor que está trabajando en modo generador.

En estos casos, la energía fluye desde el motor al variador hacia la etapa intermedia, y dependiendo del tipo de rectificador de que esté provisto el variador, se producirá la regeneración de energía o no.

El ondulador está formado por dispositivos electrónicos bidireccionales, es decir, que permiten el paso de la corriente en ambos sentidos por lo que, en régimen generador, la energía puede circular desde al motor hacia la etapa intermedia.

Sin embargo, el rectificador habitualmente empleado en la construcción de los variadores no es bidireccional y la energía no puede fluir desde la etapa intermedia a la red, quedando confinada en la etapa intermedia, con el consiguiente aumento de la energía almacenada en los condensadores. Esto produce un aumento de la tensión hasta niveles que pueden llegar a comprometer la integridad de los dispositivos.

Opcionalmente, podemos disponer de rectificadores controlados de cuatro cuadrantes que permiten el flujo de la energía hacia la red, equipos éstos evidentemente más caros que los no regenerativos.

En cada accionamiento deberemos de elegir la mejor solución bajo criterios técnicos y económicos pues la regeneración de energía tiene un retorno económico en el coste por la energía devuelta a la red.

El variador regenerativo es utilizable en aplicaciones individuales, por contraste con aplicaciones en configuración de bus de continua, con varios accionamientos en un mismo conjunto.

El bus de continua se usa en determinadas aplicaciones en las que varios motores intervienen en un mismo accionamiento o equipo. En esta configuración un único rectificador común proporciona la corriente continua a una etapa intermedia usada por varios onduladores.

La energía regenerada por aquellos onduladores que estén trabajando en modo regenerativo puede ser empleada por otros onduladores que estén trabajando en modo motor sin necesidad de su regeneración a red. La energía no precisa ser derivada a la red, por cuanto el conjunto de los accionamientos tiene un consumo neto de energía positivo.

Una aplicación típica es el puente grúa. Existen puentes grúa de alta capacidad de servicio y velocidad, como por ejemplo en plantas de electrolisis de zinc o aluminio, en las que la tasa de utilización es muy elevada y los tiempos utilizados en las rampas de parada pueden ser críticos y se imponen tiempos de frenado cortos. En estos casos, el sistema de control marca la posición objetivo y determina una trayectoria óptima en tiempo y consumo energético. Mientras un motor de traslación de carro está en modo generador, el motor de traslación de puente puede estar en modo motor, recuperando la energía del primero.

La solución no obstante más habitual y simple cuando un motor trabaja en modo generador, es la instalación de resistencias de frenado en la etapa de corriente continua, a las cuales se envía la energía excedente que es disipada en forma de calor.

No se produce regeneración como tal, ni por tanto recuperación de energía a la red, sino que la energía de frenado es disipada en forma de calor.

Esta configuración permite además frenados rápidos sin calentamiento adicional del motor, a diferencia del caso del frenado por inyección de corriente continua en el cual el motor sufre un intenso calentamiento.

4.3.3. Accionamientos de bombas centrífugas con variador de velocidad. Técnicas de ahorro de energía con el uso del variador de velocidad

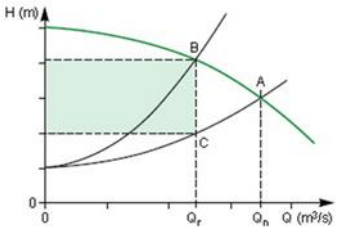
La característica caudal/presión de una bomba centrífuga está relacionada directamente con su velocidad de rotación.

Si consideramos la bomba aislada (sin tener en cuenta la altura de la columna de agua), a una velocidad de giro N, diferente de la velocidad nominal N_n se verifica lo siguiente:

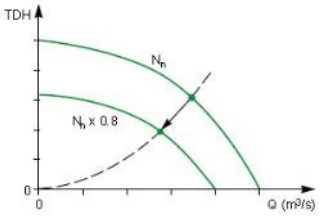
- El caudal Q es sensiblemente proporcional a la relación de velocidades
- La altura manométrica (TDH) es sensiblemente proporcional al cuadrado de la relación de velocidades
- La potencia P es sensiblemente proporcional al cubo de la relación de velocidades

Estas reglas sobre las bombas son aproximadas, pero se cumplen en un amplio rango de variación de velocidad.

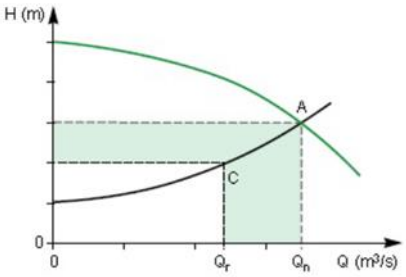
Es posible variar el caudal de una bomba a velocidad fija utilizando una válvula colocada aguas abajo.



Opcionalmente, mediante el uso de un variador de velocidad se puede obtener una reducción de la potencia del sistema, alterando la velocidad de giro de la bomba.



La potencia útil suministrada por la bomba es proporcional a las áreas rectangulares definidas en las gráficas de presión/caudal por el punto de funcionamiento; se evidencia de la visión de estas gráficas una reducción significativa de potencia en la configuración de velocidad variable, con respecto la solución basada en válvula colocada aguas abajo o a una configuración de válvulas en by-pass.



Variar la velocidad de giro permite usar la bomba siempre en su nivel de eficiencia más alto.

La principal ventaja de la utilización de variadores de velocidad en combinación con bombas centrífugas es la disminución de la potencia a utilizar y el consiguiente ahorro energético, además de permitir una mayor flexibilidad en el diseño y la puesta en marcha de las instalaciones.

Permite la eliminación de las válvulas para ajustar el caudal máximo y la reducción de ruido y vibraciones, menor riesgo de golpe de ariete y cavitación.

El control de la velocidad permite a la bomba funcionar con un rendimiento máximo y aumenta la esperanza de vida de rodamientos y juntas.

Los fabricantes de variadores suelen disponer de familias de producto específicos para estas aplicaciones de par cuadrático, considerando que, en estos casos, al no ser preciso disponer de sobrepar en el arranque, se dimensionan los circuitos sin estas prestaciones, abaratando de este modo el producto final.

4.3.4. Accionamientos de ventiladores con variadores de velocidad. Técnicas de ahorro de energía con el uso del variador de velocidad

Los ventiladores son máquinas diseñadas para impulsar un fluido gaseoso con poca compresión. Están gobernados por las mismas leyes de la mecánica de fluidos que se aplican a las bombas centrífugas, por lo que existen numerosas analogías entre los dos tipos de máquinas.

Hay muchas configuraciones diferentes de ventiladores en las cuales el factor más significativo es la presión de impulsión, hablándose habitualmente de ventiladores de baja, media y alta presión.

La presión diferencial creada por el ventilador puede ser expresada como la altura geométrica del fluido, al igual que en el caso de las bombas centrífugas de fluidos líquidos.

La relación entre la altura manométrica H y la potencia P, en el caso del ventilador centrífugo, varía en función del caudal Q, para una velocidad de giro constante.

En la mayoría de los casos, el circuito de salida no presenta una presión diferencial notable pues los circuitos de entrada y de salida están ambos a presión atmosférica).

La forma de la curva característica del circuito se explica por las caídas de presión, que son proporcionales al cuadrado del caudal. La curva H (Q) del circuito es, por tanto, una parábola que pasa por el origen.

El punto de funcionamiento de un ventilador instalado en un circuito se determina por la intersección de las dos curvas características, la del ventilador y la del circuito.

El área de la izquierda del pico de la curva característica debe evitarse, porque presenta riesgo de inestabilidad y podría llevar a oscilaciones de caudal y de presión, así como a un ruido anormal y un estrés mecánico considerable.

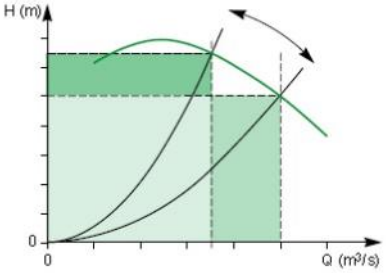
Para variar el caudal de un ventilador funcionando a velocidad fija se utilizan diversos tipos de aparatos mecánicos.

Una primera opción es usar aparatos colocados aguas abajo del ventilador.

El principio consiste en colocar un aparato dentro del conducto de aire para controlar las caídas de presión del circuito. Dependiendo del tamaño del conducto, el aparato puede ser una válvula, una compuerta o un conjunto multicompuerta.

Este método es la manera más simple de variar el caudal, pero su eficiencia energética es baja.

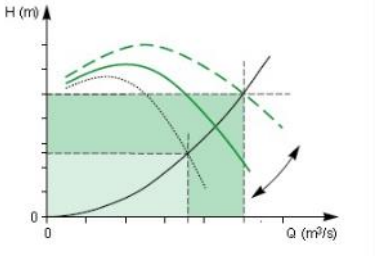
Para los dos puntos de funcionamiento representados en el gráfico, los valores de la potencia útil, que son proporcionales a las áreas rectangulares sombreadas, son muy parecidos. Con caudales bajos, una parte significativa de la energía se disipa en el



fluido.

Una segunda opción es utilizar dispositivos de regulación colocados aguas arriba del ventilador.

El objetivo de estos aparatos es alterar la curva característica del ventilador, es decir, desplazar el punto de funcionamiento, pero sin cambiar la curva característica del circuito. La eficiencia energética mejora significativamente porque, con un caudal



reducido, el ventilador no produce presión superflua.

Se dispone de diversas tecnologías, incluyendo: registros, válvulas de mariposa, compuertas y aspas orientables.

Con estos aparatos, las curvas características del ventilador se modifican desplazando los puntos de funcionamiento punto a punto a lo largo de una parábola.

Podemos observar una reducción significativa de la potencia a caudal reducido. Esta alteración de las curvas características produce una menor pérdida de eficiencia que la causada por la instalación de una compuerta en cualquier otro punto del circuito.

Con ventiladores helicoidales, el caudal puede ajustarse variando el ángulo de las aspas. A causa de la complejidad del mecanismo, esta técnica sólo se utiliza en grandes ventiladores. Este método es sin embargo de gran eficiencia energética.

El caudal también se puede ajustar utilizando un circuito de by-pass, pero es antieconómico ya que el consumo de energía es siempre el máximo, independientemente del caudal efectivo.

En muchos casos, los ventiladores están sobredimensionados para obtener un caudal máximo que es más grande que el caudal necesario. En este caso, se instalan compuertas para reducir el caudal o la velocidad del aire de la salida y se ajustan en la puesta en marcha de la instalación.

Esto resulta en una caída de presión constante que reduce la eficiencia energética.

En este tipo de situación, cuando por diseño sea posible, es preferible el ajuste de la característica del ventilador variando su velocidad fija mediante el redimensionamiento de poleas.

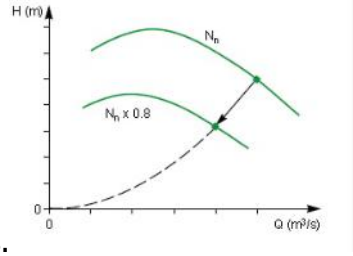
Otro inconveniente del funcionamiento a velocidad constante es que el nivel sonoro es siempre el máximo.

Sin embargo, una vez más, la mejor opción bajo el punto de vista de la eficiencia energética es el funcionamiento a velocidad variable

Variar la velocidad permite utilizar el ventilador siempre a su nivel más alto de

eficiencia.

Esto significa que las áreas rectangulares sombreadas son directamente proporcionales a la potencia absorbida por los ventiladores.



La variación de la velocidad es, por tanto, el método que ofrece la mayor eficiencia energética, al desplazarse la curva característica a diferentes velocidades, optimizando el consumo para un circuito determinado.

Si comparamos las variaciones de potencia que producen los tres métodos principales de variación del caudal: aparato instalado aguas abajo, aparato instalado aguas arriba y velocidad variable comprobamos que la opción de variación de la velocidad es la más eficiente en cualquier condición de marcha.

4.3.5. Compresores de aire comprimido. Uso eficiente del aire comprimido y su generación

La función fundamental de un compresor es aumentar la presión de un gas de la presión de succión hasta la presión de descarga.

La compresión de aire y gas tiene numerosas aplicaciones en la industria. Se pueden citar:

- La producción de energía mecánica para diferentes tipos de actuadores (atornilladores, cilindros neumáticos, etc.).
- La producción de gases industriales para su licuefacción (nitrógeno, oxígeno, gas natural, etc.).
- Aire acondicionado y refrigeración.
- Aireación en tratamiento de aguas residuales en plantas depuradoras.
- Producción frigorífica

Las necesidades en términos de caudal y presión varían mucho, por eso se han desarrollado diferentes tecnologías. Las más comunes son:

- Compresores centrífugos
- Compresores de tornillo
- Compresores de pistones
- Compresores de paletas
- Turbocompresores
- Compresores lobulares

En general, el par de motor desarrollado aumenta con la velocidad, pero el par de arranque, a veces, puede ser alto, como en el caso de los compresores de pistones.

Para atender las fluctuaciones de demanda del sistema, los compresores suelen incorporar un sistema para la regulación de presión.

Se citan a continuación los métodos principales de regulación, que son los adecuados a las características de las diferentes tecnologías:

- Arranque y parada del compresor.
  El funcionamiento intermitente es adecuado para los compresores de potencia baja, que pueden arrancarse frecuentemente sin inconvenientes. Durante las

fases de funcionamiento, el compresor funciona a su nivel óptimo de eficiencia

- Recirculación o evacuado del exceso de caudal
  Por su baja eficiencia de energética, este método de funcionamiento sólo se aplica a los sistemas de baja potencia.
- Reducción de parte o de toda la carga mediante la actuación de la válvula o la compuerta de succión del compresor.
  El compresor trabaja a una carga reducida o cero, así se reduce la potencia eléctrica absorbida.
- Instalación de varios compresores en paralelo.
  El número de compresores en marcha puede ajustarse a la demanda.
- Variación de la velocidad del compresor.
  Este método es el que tiene mejor rendimiento energético.

Variar la velocidad de un compresor es un método adecuado para la mayoría de las tecnologías.

Presenta un gran número de ventajas:

- Arranque en rampa
- Sin picos de corriente, se reduce el estrés mecánico.
- Regulación precisa de la presión.
- La velocidad del compresor y, por tanto, el caudal puede ajustarse a la demanda, lo que reduce la amplitud de las fluctuaciones de presión y el tamaño de los depósitos de acumulación.
- Eficiencia óptima: Funciona reduciendo las caídas de presión en el circuito, permite la reducción de las pérdidas de energía.

La variación de velocidad también es adecuada para los compresores que trabajan en paralelo.

En general, sólo uno de los compresores funciona a velocidad variable, mientras los otros lo hacen en marcha - paro.

4.3.6. El motor síncrono.

En los últimos años, las tecnologías de producción de los llamados imanes permanentes, ha permitido sustituir los polos magnéticos generados por bobinas inductoras de las máquinas síncronas, por este tipo de imanes mucho más compactos y sin consumo energético. Además, su carácter permanente permite su instalación en el rótor, con la consiguiente reducción de sus diámetros y pesos.

El uso de imanes permanentes en la construcción de máquinas síncronas ha permitido aumentar significativamente el rendimiento de este tipo de máquinas en su aplicación como motor, al no precisar corrientes polarizantes en el devanado inductor para generar los polos de excitación.

Este incremento del rendimiento ha permitido su uso emergente en aplicaciones de bombeo, compresores de frío o de aire comprimido, por ejemplo, o en aplicaciones en las que se requieren elevadas velocidades rotóricas, merced a la posibilidad de alojar los devanados inductores en el rótor y disminuir su diámetro, permitiendo así alcanzar elevadas revoluciones, muy difíciles de conseguir mediante el uso de motores asíncronos.

La máquina síncrona trabajando en régimen como motor, tiene el inconveniente de que sólo puede proporcionar par motor si la velocidad del rótor es idéntica a la velocidad de sincronismo, es decir, si el rótor está parado no hay par de arranque cuando al estátor le aplicamos la tensión de red a 50 Hz. No es posible su arranque por alimentación directa a la red desde el estado de reposo.

Tradicionalmente las soluciones a este problema han pasado por el acoplamiento de motores asíncronos (llamados "motor pony") que lleven al síncrono a velocidades próximas a las de sincronismo o la utilización de devanados auxiliares en jaula de ardilla en el rótor. Esto limitaba su uso a aplicaciones muy limitadas.

La irrupción a escala industrial de los denominados imanes permanentes ha permitido reducir los costes de producción y operación del motor síncrono. Los imanes de Neodimio mantienen sus características magnéticas en el tiempo, con un importante ahorro de espacio, lo cual permite su disposición en rotores de perfil de bajo diámetro que reducen pérdidas mecánicas y permiten altas velocidades.

Por otro lado, el desarrollo de la electrónica de potencia también se ha adaptado a estas aplicaciones.

El uso de motores síncronos de imanes permanentes con electrónica de potencia ha permitido por ejemplo su utilización en aplicaciones de elevación (ascensores), con motores directos sin reductor. El propio motor puede accionar el dispositivo de elevación desde velocidad cero directamente a la polea de elevación, eliminando el mecanismo reductor, con el consiguiente ahorro energético, de ruidos y mantenimiento.

La utilización de motores síncronos también ha encontrado hueco en aplicaciones de marcha continuada, como por ejemplo compresores industriales que permanecen en marcha de forma semipermanente.

Cuando el régimen de carga es variable, la utilización de motores de imanes permanentes con accionamientos de frecuencia variable permite ahorros energéticos sustanciales que justifican sobradamente el coste adicional de inversión.